

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 524.1

Результаты регистрации радиоизлучения на частоте 32 МГц на Якутской установке ШАЛ

З.Е. Петров, Д.С. Борщевский, С.П. Кнуренко, В.И. Козлов, И.С. Петров, М.И. Правдин

Анализируется новая серия измерений радиоизлучения на частоте 32 МГц от широких атмосферных ливней (ШАЛ) сверхвысоких энергий за период 2009–2011 гг. Описаны основные механизмы генерации радиоизлучения. Приводятся первые результаты анализа экспериментальных данных и их интерпретация в рамках различных механизмов возникновения радиоизлучения ШАЛ. Показано затухание радиосигнала от ШАЛ с увеличением расстояния от оси ливня.

Ключевые слова: космические лучи, ШАЛ, радиоизлучение, пространственное распределение, поляризационный эффект, черенковское излучение, геомагнитный механизм излучения.

The new set of measurements of radio emission from ultra-high energy particles at 32 MHz for period 2009–2011 is analyzed. The main generation mechanisms of radio emission are described. First results of experimental data analysis and their interpretation in the frame of various generation mechanisms of EAS radio emission are presented. EAS radio emission attenuation with the distance from shower axis is showed.

Key words: cosmic rays, EAS, radio emission, spatial distribution, polarization effect, Cherenkov radiation, geomagnetic emission mechanism.

Введение

Детектирование космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий осуществляется с помощью традиционных методов регистрации ионизирующего излучения, в основе которых лежит применение сцинтилляционных счетчиков [1]. Из-за крайне низкой интенсивности КЛ в современных установках для регистрации частиц с энергией до 10^{20} эВ количество счетчиков может быть чрезвычайно велико и занимать площадь 10–3000 км². При этом на 1 км² падает 1 частица с энергией 10^{19} эВ в год [2]. За 50 лет, прошедших с момента регистрации первого события КЛ

с энергией выше 10^{20} эВ (1962, детектор Volcano Ranch, США [3]), на пяти крупнейших установках космических лучей удалось зарегистрировать лишь около десяти событий ШАЛ с энергией $E \geq 10^{20}$ эВ и менее сотни событий с $E \geq 5 \cdot 10^{19}$ эВ. Для детального изучения КЛ таких энергий необходимо увеличить статистику наблюдений. Существующие установки, основанные на регистрации с помощью сцинтилляционных детекторов и черенковского и ионизационного свечения, близки к пределу по площади обзора, достижимой для наземных детекторов. По-видимому, дальнейшее расширение энергетического диапазона экспериментальных установок и увеличение статистики КЛ предельно высоких энергий могут быть связаны с развитием радиометода детектирования КЛ. Как показали первые измерения, этот вид наблюдения имеет практическую перспективу, не требует сложной аппаратной части в регистрации ШАЛ и является менее затратным в финансовом отношении.

Радиоизлучение от ШАЛ было впервые зарегистрировано Джелли и др. в 1965 г. на частоте

ПЕТРОВ Зим Егорович – д.т.н., в.н.с. ИКФИА СО РАН; БОРЩЕВСКИЙ Денис Сергеевич – аспирант ИКФИА СО РАН; КНУРЕНКО Станислав Петрович – к.ф.-м.н., с.н.с. ИКФИА СО РАН, s.p.knurenko@ikfia.ysn.ru; КОЗЛОВ Владимир Ильич – к.ф.-м.н., в.н.с. ИКФИА СО РАН, v.kozlov@ikfia.ysn.ru; ПЕТРОВ Игорь Степанович – аспирант ИКФИА СО РАН, igor.petrov@ikfia.ysn.ru; ПРАВДИН Михаил Иванович – к.ф.-м.н., в.н.с. ИКФИА СО РАН, m.i.pravdin@ikfia.ysn.ru.

44 МГц [4]. С тех пор с разной периодичностью радиоизлучение исследуется на малых и крупных установках ШАЛ. В настоящее время радиоизлучение исследуется на установках: Auger [5], CODALEMA [6], LOPES [7], LOFAR [8] и др. Целью этих исследований является установление механизмов генерации радиоизлучения от ШАЛ и возможного применения его как дополнительного метода для изучения ШАЛ сверхвысоких и предельных энергий выше 10^{19} эВ.

Радиоизлучение на Auger регистрируется 21 антенной (в будущем планируют увеличить до 160) на частоте от 27 до 84 МГц. Антенны представляют собой диполи с диаграммой направленности север–юг, восток–запад.

Установка CODALEMA состоит из 24 дипольных антенн с расстоянием между ними 90 м. Регистрируются сигналы с частотой от 23 до 83 МГц.

Эксперимент LOPES, изначально, был прототипом LOFARa, чтобы проверить возможность регистрации ШАЛ по радиоизлучению. Установлены 30 дипольных антенн, регистрирующих радиоизлучение на частоте 40–80 МГц.

LOFAR представляет собой цифровой радиотелескоп, состоящий из 48 станций. Каждая станция состоит из одной или двух широкополосных антенн, работающих в диапазоне 110–250 МГц, и узкополосных – 10–80 МГц.

Механизмы возникновения радиоизлучения при прохождении потока заряженных частиц ШАЛ сверхвысоких энергий

В теоретических моделях рассматриваются разные механизмы радиоизлучения ШАЛ, например, механизм когерентного черенковского излучения [9]. Избыток электронов, как следствие аннигиляции позитронов ливня и вовлечения в лавину комптон- и δ -электронов. Избыток электронов со средней энергией $\sim 10^{18}$ эВ может достигать 10% от общего числа частиц в ливне. При большем их числе когерентное излучение избыточного отрицательного заряда может достичь высокой интенсивности.

Также рассматривается геомагнитный механизм излучения. Обновление частиц в электронно-фотонной лавине происходит за время, приблизительно равное отношению радиационной единицы длины к скорости света [1]. Тогда среднее время «жизни» частицы, время, в течение которого ее энергия уменьшается в e раз, составляет 10^{-6} с. Кроме воздействия со стороны нейтральных атомов атмосферы, приводящего к рассеянию частиц и образованию ливневого диска, на заряженные частицы ШАЛ действует магнитное поле Земли. Оно накладывает на не-

зависимое от заряда поперечное перемещение частиц направленное движение, перпендикулярное оси ливня и магнитному полю, причем электроны и позитроны движутся по взаимно противоположным направлениям. Такое направленное движение частиц представляет собой электрический ток, значение которого определяется величиной заряда, прошедшего через условную площадь поперечного сечения. Этот поперечный ток в ливне можно рассматривать как причину поляризации нейтрального в целом диска. При движении в магнитном поле диск позитронов и диск электронов раздвигаются во взаимно противоположных направлениях, образуя электрический диполь, направление которого совпадает с направлением поперечного тока. На том участке движения ливня, где число частиц близко к максимальному, можно считать, что в поперечном направлении имеет место динамическое равновесие, при котором число рождающихся в стволе частиц равно числу частиц, выбывающих из ливня. Поэтому ШАЛ можно уподобить движущемуся квазистатическому диполю, в котором поперечный ток поддерживает дипольный момент. Таким образом, в модели геомагнитного механизма радиоизлучения распространение ШАЛ сопровождается следующими процессами, приводящими к излучению:

- 1) появлением избыточного заряда [9];
 - 2) продольным движением квазистатического диполя со скоростью, превышающей скорость электромагнитных волн в атмосфере Земли;
 - 3) таким же движением продольного тока, поддерживающего поляризацию диска.
- Причиной радиоизлучения может быть также ускоренное движение в электростатическом поле Земли (геоэлектрический механизм), напряженность которого вблизи поверхности при ясной погоде составляет около $100 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, постепенно понижаясь до $1 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ на высоте 20 км. Существуют три случая, которые приводят к радиоизлучению от широкого атмосферного ливня в статическом поле:

- 1) поперечное разделение быстрых частиц ливня (с энергией до 10^8 эВ) под воздействием компонента поля, перпендикулярного направлению движения (то есть только для наклонных и горизонтальных ливней) [10–12];
- 2) продольное разделение быстрых частиц под действием компонента поля E_r , параллельного направлению распространения ливня;
- 3) движение медленных (ионизационных) электронов, то есть тех, которые из-за недостатка энергии не способны ионизировать атомы воздуха.

Еще один механизм излучения – это ускорение ионизационных электронов [13]. Суть явления в этом случае заключается в заранее известной «программе включения» излучателей – ионизационных электронов. Излучатели начинают действовать в момент прихода ливневого диска, скорость которого превышает скорость распространения поля в среде.

При движении в магнитном поле заряженная частица отклоняется от прямолинейного движения и вследствие чего излучает электромагнитные волны. Такое излучение называют синхротронным или магнитотормозным. Если скорость частицы близка к скорости света, то диаграмма направленности излучения имеет угловую ширину порядка $1/\gamma$, где γ – Лоренц-фактор.

В 60–80-е годы прошлого столетия активно проводились исследования по изучению природы и, частности, механизмов генерации радиоизлучения от ШАЛ. Например, в работе С.Н. Вернова и др. [14] проводились исследования по выявлению преимуществ одного механизма генерации радиоизлучения от ШАЛ над другими. Тогда экспериментально не удалось точно доказать преимущества одного механизма над другими. В дальнейшем такие работы, но уже на более качественной аппаратуре, проводились и проводятся как в России (Якутск), так и за рубежом (Франция, Германия и Америка). В настоящее время в эксперименте CODALEMA показано, что существует большая вероятность преимущества геомагнитного механизма над другими [6]. Первые измерения радиоизлучения от ШАЛ (в том числе и на Якутской установке, см. работу [15]) показали, что выявленная поляризация излучения более соответствует действию геомагнитного механизма образования радиоизлучения от ШАЛ, так как сигнал зависит от направления прихода ШАЛ (преимущественно от азимутального угла). Тем не менее, на данном этапе исследований нельзя полностью исключить и участие в генерации радиоизлучения ШАЛ черенковского механизма. Либо в формировании радиосигнала принимают участие одновременно несколько механизмов. Основанием для такого предположения могут служить большие флуктуации радиосигнала на малых и незначительные на больших расстояниях от оси ливня.

Результаты регистрации радиоизлучения от широких атмосферных ливней на частотах около 32 МГц

Для анализа было отобрано 300 событий ШАЛ с энергией выше $5 \cdot 10^{16}$ эВ, оси которых находились в пределах периметра установки, а зенитный угол θ не превышал 60° . На рис. 1 по-

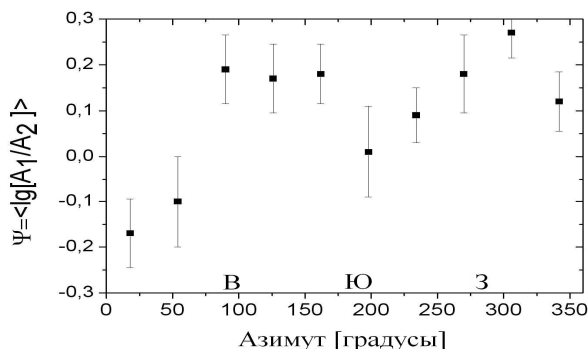


Рис. 1. Отношение амплитуд радиосигналов, зарегистрированных антеннами, ориентированными на В–З и С–Ю

казана зависимость отношения амплитуд в разнонаправленных антеннах в рабочей полосе частот. Предварительный анализ прихода событий ШАЛ по азимутальному углу показал, что имеется выделенное направление максимума сигнала – восток–запад (В–З). Амплитуда сигнала с антенн, ориентированных на В–З, была больше, чем сигнал, регистрируемый антеннами, ориентированными на север–юг (С–Ю), то есть наблюдается зависимость величины сигнала от азимутального угла. Такое явление может иметь место только в случае действия на заряженные частицы магнитного поля Земли и отношение амплитуд в данном случае отражает поляризационный эффект радиоизлучения от ШАЛ.

На рис. 2 облако точек соответствует распределению точек пересечения оси индивидуальных событий ШАЛ с плоскостью установки в интервале энергий $5 \cdot 10^{16}$ – $5 \cdot 10^{18}$ эВ и зенитных углов от 0 до 60° , сопровождаемых радиоизлучением, превысившим порог регистрации и зарегистрированным двумя и более антеннами. Антенна помещена в центр координат.

На рис. 3 показано среднее пространственное распределение напряженности электрического поля E_v , полученное по событиям ШАЛ с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ. Величина напряженности поля E_v в данном случае получена с учетом нормировки на

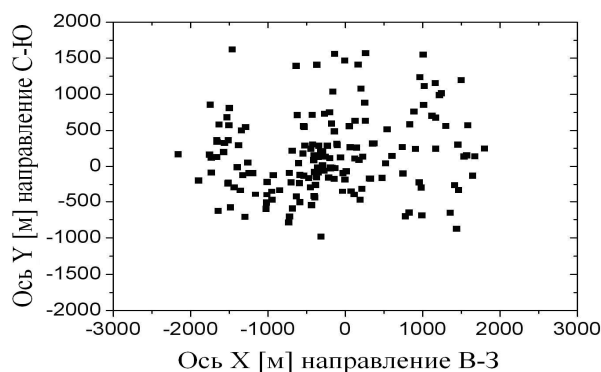


Рис. 2. Распределение точек пересечения оси индивидуальных событий ШАЛ с плоскостью установки

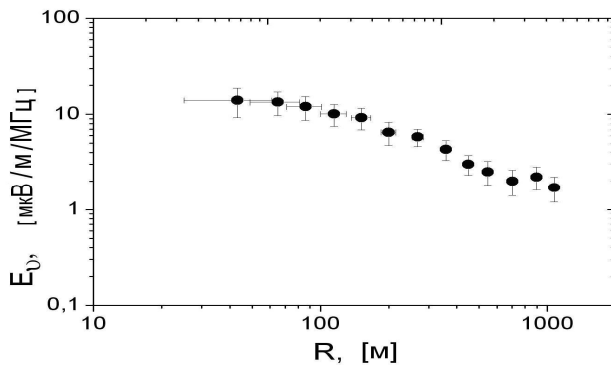


Рис. 3. Среднее пространственное распределение амплитуды радиосигнала, приведенное к $E_0=10^{17}$ эВ и зенитному углу 35°

азимутальный, зенитный углы. Приведено к зенитному углу 35° и энергии, равной $E_0 = 10^{17}$ эВ. Сделана поправка на поляризационный эффект, наблюдаемый в последнем эксперименте. Усреднение проведено в интервалах по расстоянию от центра ливня ШАЛ.

Нормировка по углам прихода ливня сделана в предположении основного вклада в радиоизлучение ШАЛ геомагнитного механизма образования радиоизлучения. Уменьшение разброса величин при нормировке говорит в пользу этого механизма образования радиоизлучения. При нормировке по энергии использовалась линейная зависимость амплитуды импульса от энергии ливня. В анализ отбирались ливни, оси которых находились в пределах периметра большой установки ШАЛ, а величина сигнала, навещенного на антенне, была в пять и более раз больше среднего радишума. Из рис. 3 видно, что сигнал изменяется незначительно на расстояниях 50–200 м и по мере удаления антенн от оси ливня на $R \geq 300$ м сигнал значительно затухает в ливнях с $E_0 = 10^{17}$ эВ. Показатель наклона спектра в степенном приближении на расстоянии до 100 м составляет $\sim 0,71 \pm 0,10$, от 100 до 700 м – $\sim 0,97 \pm 0,10$ и свыше 700 м – $\sim 0,84 \pm 0,1$. Данные по величине показателя наклона хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [13]. В мощных ливнях, рожденных частицами с энергией $E \geq 10^{18}$ эВ, сигнал на больших расстояниях от оси имеет величину 100–1000 мкВ и уверенно регистрируется аппаратурой. Необходимо отметить, что на малых расстояниях от оси ливня имеется значительный разброс регистрируемых амплитуд. Вероятнее всего, это связано с вкладом различных механизмов генерации радиоизлучения.

Измерения радиоизлучения от ШАЛ на Якутской установке показали, что радиоимпульсы на частотах около 32 МГц достаточно хорошо могут быть выделены на фоне различных радио-

шумов. Таким образом, регистрация радиоизлучения от ШАЛ может быть использована для изучения физики частиц сверхвысоких энергии. Например, как показали расчеты в [16], используя крутизну функции пространственного распределения, можно определить глубину максимума развития ливня $X_{\max}$, а используя максимальную амплитуду сигнала – энергию первичной частицы, вызвавшей ШАЛ. В дальнейшем, как показывают расчеты, применяя эти характеристики, можно дать и оценку массового состава космических лучей в области сверхвысоких энергий.

Выводы

Результаты анализа экспериментальных данных показали: а) основным механизмом, ответственным за радиоизлучение ШАЛ, является геомагнитный, так как наблюдается зависимость величины сигнала от направления прихода события ШАЛ, то есть от азимутального угла и это свидетельствует о поляризации диска ШАЛ [6]. Вклад других механизмов в генерацию излучения от ШАЛ требует более тщательного исследования и дальнейшего анализа экспериментальных данных; б) пространственное распределение радиоизлучения ШАЛ имеет сложную форму (изменяется с расстоянием до оси ливня), что свидетельствует о зависимости этой характеристики от высоты максимума рождения основной массы заряженных частиц [7] и может быть использовано для определения максимума развития ШАЛ и в дальнейшем для оценки массового состава космических лучей сверхвысоких энергий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки, контракт № 16.518.11.7075, и РФФИ-грант № 11-02-12193 офи-м-2011, № 11-02-00158.

Литература

1. Филоненко А.Д. Детектирование космических лучей по электромагнитной радиоэмиссии ливня и возможности этого метода в диапазоне сверхвысоких энергий // УФН. – 2002. – Т. 172, № 4. – С. 439–471.
2. Царев В.А. Регистрация космических лучей ультравысоких энергий радиометодом // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2004. – Т. 35, № 1. – С. 1–49.
3. Linsley J // Phys. Rev. Lett. – 1963. – V. 10. – P. 146–148.
4. Jelley J.V., Fruin J.H., Porter N.A. et al. // Nature. – 1965. – V. 205. – P. 327.
5. J. Kelley for the Pierre Auger Collaboration // arXiv:1107.4807 [astro-ph], 2011.

6. *D. Ardouin and the CODALEMA Collaboration* // arXiv: 0901.4502 [astro-ph], 2009.
7. *Apel W.D. et al.* LOPES Collaboration // arXiv: 0910.4866v1 [astro-ph], 2009.
8. *Corstanje A. et al.* LOFAR Collaboration // arXiv: 1109.5800v1 [astro-ph], 2009.
9. *Аскарьян Г.А.* Избыточный отрицательный заряд электрон-фотонного ливня и когерентное излучение от него // ЖЭТФ. – 1961. – 41, №2(8). – С. 616–618.
10. *Chairman W.N.* Atmospheric Electric Field as a Possible Cause of Radio Pulse from EAS // Nature 215 497 (1967).
11. *Chairman W.N. and Jelley J.V.* The atmospheric electric field as a source of RF emission from EAS, and some notes on bremsstrahlung // Phys. 46 216 (1968).
12. *Sivaprasad K.*, in 15th Cosmic Ray Conf., Plovdiv, Bulgaria, 1977: Conf. Papers (Eds C Ya Christov et al.) Vol. 8 (Sofia: Institute for Nucl. Res. And Nucl. Energy, Bulgarian Acad. Of Sci., 1978) P. 484.
13. *Tompkins D.R. (Jr)* Phys. Rev. D 10 136 (1974).
14. *Вернов С.Н., Абросимов А.Т., Воловик В.Д. и др.* // Радиоизлучение ШАЛ космических лучей // Письма ЖЭТФ. – 1966. – С. 157–162.
15. *Петров З.Е., Борщевский Д.С., Кнуренко С.П. и др.* Исследование радиоизлучения на частоте 32 МГц на Якутской установке широких атмосферных ливней // Вестник СВФУ (в печати).
16. *Huege T., Ulrich R., Engel R.* // arXiv: 0806.1161v2 [astro-ph], 2008.

Поступила в редакцию 15.12.2011

УДК 378.147

Методика использования пакета Maple для решения задач квантовой механики

Е.П. Шарин, Ю.М. Григорьев, С.Н. Еремеев, Б.В. Яковлев

Решения многих задач квантовой механики сопряжены с трудностями использования сложного математического аппарата. Пакет Maple является удобным инструментом для решения таких задач. Показана методика использования пакета Maple на персональном компьютере для решения задач квантовой механики с использованием специальных функций.

Ключевые слова: Maple, квантовая механика, специальные функции, линейный гармонический осциллятор.

Solutions of many quantum mechanics problems tend to be obscured in the profusion of mathematics. Interactive software for computer algebra, Maple can assist educator and students to overcome the obstacle of mathematical difficulties. Methods of using Maple for quantum mechanics problems solutions on a personal computer with special functions are presented.

Key words: Maple, quantum mechanics, special functions, linear harmonic oscillator.

Введение

Характер развития современного общества, происходящие в нем глобальные социально-экономические и научно-технические процессы активизируют применение инновационных подходов к процессу обучения, гармонично дополняющих традиционные. В последние годы интерес к данной проблеме приобрел особую значи-

мость, что связано с информатизацией системы образования и, как следствие, внедрением новых информационных технологий в учебный процесс.

Квантовая механика является одним из важных разделов физики, занимающимся исследованием явлений и процессов в микромире, недоступном непосредственному восприятию человека. Изучение квантовой механики сопряжено с рядом трудностей, а именно, использованием сложного математического аппарата, невозможностью проведения эксперимента из-за низкой технической оснащенности лабораторий, их несоответствием требованиям безопасности и др. Это затрудняет понимание абстрактно-логических понятий и закономерностей, снижа-

ШАРИН Егор Петрович – к.ф.-м.н., доцент ФТИ СВФУ, esharin@yandex.ru; ГРИГОРЬЕВ Юрий Михайлович – д.ф.-м.н., ФТИ СВФУ, акад. АН РС(Я); ЕРЕМЕЕВ Степан Николаевич – к.ф.-м.н., доцент ФТИ СВФУ, 8 (4112) 49-68-62; ЯКОВЛЕВ Борис Васильевич – д.ф.-м.н., ФТИ СВФУ, 8 (4112) 49-68-62.